



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 198 02 745 A 1**

⑤ Int. Cl.⁶:
F 02 P 23/04

⑲ Aktenzeichen: 198 02 745.1
⑳ Anmeldetag: 26. 1. 98
㉔ Offenlegungstag: 29. 7. 99

⑦1 Anmelder:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 76133
Karlsruhe, DE

⑦2 Erfinder:

Feher, Lambert, Dr., 76351
Linkenheim-Hochstetten, DE; Link, Guido, Dr.,
76185 Karlsruhe, DE; Thumm, Manfred, Prof. Dr.,
76351 Linkenheim-Hochstetten, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:

DE	1 96 38 787 A1
US	44 46 826
JP	59-2 15 967 A
JP	57-1 86 067 A
JP	59-70 886 A
JP	55-7 972 A

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung für einen Kraftstoffmotor

⑤7 Das in den jeweiligen Brennraum eines Kraftstoffmotors eingebrachte Luft-Kraftstoff-Gemisch wird durch einen zum Zündzeitpunkt einsetzenden Mikrowellenpuls vorgegebener Frequenz und einstellbarer Dauer gezündet. Dabei wirkt der Brennraum mikrowellentechnisch als Resonator, in dem die eingekoppelte Mikrowelle eine für den Zündvorgang wirksame Mode oder ein wirksames Modengemisch erregt. Nach der zunächst selbständig ablaufenden Verbrennung unterstützt ein dem Zündpuls nachfolgender Mikrowellenpuls gleicher Frequenz und ebenfalls einstellbarer Dauer durch die Anregung zumindest einer Mode hoher oder höherer Ordnung die restliche Verbrennung noch nicht vollständig verbrannter Produkte oder noch vorhandener Kraftstoffreste. Fette sowie magere Luft-Kraftstoff-Gemische sind mit dieser mikrowellentechnischen Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung einwandfrei entzündbar und werden vollständig verbrannt.

DE 198 02 745 A 1

BEST AVAILABLE COPY

BUNDESDRUCKEREI 06.99 902 030/324/1

22

Die Erfindung betrifft eine mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung für einen Kraftstoffmotor mit mindestens einem Brennraum zur Zündung eines in den jeweiligen Brennraum eingebrachten Kraftstoffgemischs und zur unterstützenden Verbrennung desselben. Sie besteht aus einer pulsaren Mikrowellenquelle, von der für die abgegebene Frequenz Mikrowellenleiter zu den Brennräumen des Motors führen, so daß die Mikrowelle über Öffnungen in der feststehenden Brennraumbewandlung zum vorgesehenen Zündzeitpunkt in den als Resonatorraum wirkenden Brennraum und erneut zur Unterstützung der Verbrennung in der abklingenden Verbrennungsphase einkoppelt.

Zweck dieser Zündungstechnik und unterstützten Verbrennung ist die effektive Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemischs im Brennraum.

Experimente mit dem Ziel, mikrowellenunterstützte Verbrennung magerer Kohlenwasserstoff-Kraftstoff-Luft-Gemische in Kraftstoffmotoren einzusetzen, wurden andererseits durchgeführt. Untersuchungen über die Geschwindigkeit der Flammausbreitung und die Verstärkung dieser bei Mager-Gemischen waren die zentrale Anliegen.

Eine kombinierte Zündtechnik, bestehend aus der konventionellen Zündfunkenzündung mit mikrowellenangeregter Verbrennung, gewissermaßen eine Hybridzündung des Kraftstoffgemischs mit Verbrennungsunterstützung, wird in dem Aufsatz "Microwave Stimulated Combustion" von M. A. V. Ward in Journal of Microwave Power 15(3), 1980 auf den Seiten 193-202 beschrieben. Mikrowellenenergie wird in eine zylindrische Verbrennungsbombe einkoppelt, in der verschiedene Propan-Luft-Gemische bei jeweils 1 atm eingeschlossen sind. Das jeweilige Gemisch wird durch den konventionellen Zündfunken und eine Plasmastrahlzündung gezündet. Im Brennraum wird die TM_{010} -Mode mit einem Magnetron bei 2.45 GHz in Leistungsbereichen um die 100 W angeregt. Der Einsatz der Mikrowellenenergie erlaubt eine beträchtliche Ausdehnung der Magergrenze des Kraftstoffgemischs und bewirkt eine Verdopplung der Flammgeschwindigkeit nahe der Magergrenze der plasmastrahlgezündeten Kraftstoffmischung.

Die Flammentwicklung unter Mikrowelleneinfluß haben E. G. Groff und M. K. Krage ebenfalls untersucht, um die über einen Brenner in einen Hohlraumresonator eingeströmten Luft-Kraftstoff-Gemische zu untersuchen. Hierzu wird eine Flamme auf der Achse des Resonators aufgestellt. In den Resonator werden Mikrowellen der Frequenz von etwa 2.4 GHz einkoppelt, die in der niedrigen TM_{010} -Mode resonieren. Daraus resultieren elektrische Feldintensitäten, die über 10^5 V/m lagen. Für Mager-Luft-Gemische wird beobachtet, daß die Brenngeschwindigkeit mit der elektrischen Feldintensität zunimmt. Dies wird auf die Mikrowellen-Heizung zurückgeführt, die eine höhere Flammtemperatur bewirkt (siehe Combustion And Flame 56.293-306 (1984)).

Aus der Erkenntnis, daß die Flammgeschwindigkeit bei niedriger Verbrennungstemperatur unter Mikrowelleneinfluß erhöht werden kann, stellte sich die Aufgabe, die der Erfindung zugrunde liegt. Diese ist, eine Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung mittels Mikrowellentechnik zu entwickeln, mit der es möglich ist, ein Luft-Kraftstoff-Gemisch im Brennraum eines Kraftstoffmotors sicher mit einer darin einkoppelten Mikrowelle zu zünden und die Verbrennung mit ihr optimal zu unterstützen. Bei dem Kraftstoff handelt es sich um herkömmliche Kohlenwasserstoff-Verbindungen, wie sie bei selbstzündenden und fremdgezündeten Motoren üblicherweise verwendet werden.

Die Aufgabe wird durch eine mikrowellentechnische Zünd- und unterstützende Verbrennungs-Einrichtung gemäß Anspruch 1 gelöst. Die Hauptkomponenten sind dabei die Mikrowellenquelle, die auf die Betriebsfrequenz abgestimmten Mikrowellenleiter von der Quelle bis zum jeweiligen, aus Zylinder und Kolbenstirn gebildeten Brennraum als Resonator. Wesentlich ist die Erzeugung eines Modengemischs durch mindestens eine Einkoppelöffnung, die in den feststehenden Brennraumwänden vorhanden ist. Das Modengemisch soll für die Zündung aus mindestens zwei Moden bestehen, wovon vorteilhafter Weise die eine eine zentrale konzentrierte Mode niedriger Ordnung und die andere eine um die Kolbenachse gleichverteilte, nahe der Brennraumwand gelegene Mode hoher Ordnung ist (sog. Whispering-Gallery-Mode). Im Brennraum wird für die Zündung eine Gesamthomogenität der elektrischen Feldstärkeverteilung erreicht, die sich sowohl radial zur Kolbenachse ausbildet und auch parallel zur Kolbenachse ausdehnt. Die Leistung der einkoppelnden Mikrowelle ist dabei so hoch, daß sich die Feldstärkeüberhöhungen des Whispering Gallery Modes und des Grundmodes sicher über der Zündfeldstärke für ein Kraftstoffgemisch von 100 kV/m befinden.

Durch den zumindest unmittelbar nach der Zündung selbständigen Abbrand des Luft-Kraftstoff-Gemisches ändert sich u. a. auch die hochfrequentechnische Eigenschaft der Brennraumfüllung ganz wesentlich, und zwar durch eine Erhöhung der Resonatorgüte, so daß sich das in der Zündphase angeregte Modengemisch nicht unmittelbar anregen läßt. Vielmehr wird mit der anregenden Mikrowelle gleicher Frequenz lediglich noch die gleichverteilte Mode hoher Ordnung (Whispering-Gallery-Mode) nahe der Brennraumwand angeregt. Diese hat genau den Vorteil, daß dort unvollständig verbrannter Kraftstoff oder Verbrennungsreste vollständig durch die Mikrowelleneinwirkung abbrennen, wodurch die Brennraumwände von anhaftenden Rußkondensaten freigehalten werden.

Da zur Ausbildung solcher für die Zündung und zur Unterstützung der restlichen Verbrennung nützlicher Modengemische bzw. Moden die Brennraumgeometrie maßgebend ist, muß die einzukoppelnde Mikrowelle in ihrer Frequenz von Typ zu Typ eines solchen Kraftstoffmotors angepaßt werden. Vorzugsweise befindet sich die Einkoppelöffnung der Mikrowelle im Zylinderkopf an Stellen, wo der gewünschte Mode angeregt werden kann (Anspruch 6).

Da konditionierte Klimabedingungen im allgemeinen für einen Motorbetrieb nicht vorgesehen sind, wird eine technisch ausgereifte, robuste und daher wirtschaftlich auch günstige Mikrowellenquelle wie ein Magnetron verwendet, was aber den Einsatz anderer Mikrowellenquellen in Röhren- oder Halbleitertechnik, sofern sie sich wegen spezieller Randbedingungen nahelegen, nicht ausschließt.

Verbrennungsmotoren haben beim gegenwärtigen Stand der Technik einen zylindrischen Verbrennungs- und Hubraum (Anspruch 2), wobei der zylindrische Durchmesser für die Festlegung der Einkopplungsfrequenz einflußreich ist.

Um die Gesamthomogenität des angeregten Modengemischs oder der angeregten Mode zu erhöhen, wird ein polygonaler Brennraumquerschnitt aufgrund der vorteilhaften Homogenitätsausbildung darin nahegelegt (siehe DE 196 33 245 Hochmodiger Mikrowellenresonator), insbesondere der hexagonale (Anspruch 3 und 4).

Die Einkoppelöffnungen für die Mikrowelle befinden sich auf je den Fall in den feststehenden Wandteilen, also im Zylinderkopf oder der Zylinderwand des Brennraums (Anspruch 5).

Die Einkopplung für das Zündintervall erfolgt vorteilhafter Weise an Stellen der bestmöglichen Anregbarkeit der gewünschten Mode. Das Zeitintervall für die Einkopplung zur

Verbrennungsunterstützung liegt so, daß die nach der Zündung selbständig ablaufende Verbrennung (Plasma) in ihrer abklingenden Phase durch den nochmal einkoppelnden Mikrowellenpuls, der jetzt aufgrund der geänderten Hochfrequenzeigenschaften im Brennraum nur noch die Moden hoher Ordnung anregt.

Der Vorteil einer solchen mikrowellentechnischen Zünd- und die Verbrennung unterstützenden Einrichtung liegt in der optimalen Ausnutzung eines in die Brennräume des Kraftstoffmotors eingeleiteten mageren Luft-Kraftstoff-Gemischs. Durch die Ausbildung eines zur Kolbenachse rotationssymmetrischen Modengemischs mit säulenartiger Ausdehnung parallel zur Kolbenachse mit mindestens einer Grundmode niedriger Ordnung und einer Mode hoher oder höherer Ordnung (Whispering-Gallery-Mode) wird für die Zündung eine optimale Voraussetzung durch viele gleichzeitig vorhandene Zündquellen in Form von Feldstärke-Überhöhungsbereiche, die wesentlich über der Zündfeldstärke liegen, angeregt. Da die Zündung des Luft-Kraftstoff-Gemischs eine Eigendynamik entwickelt, die im ausgeprägten Flammzustand (Plasma) nicht mehr maßgebend von einer weiteren Mikrowelleneinkopplung beeinflusst werden kann, wird die Verbrennung nach dem Zündpuls und der primären Flamm- und Verbrennungsphase sich selbst überlassen. Lediglich beim Abklingen der Verbrennung wird erneut ein die Restverbrennung unterstützender Mikrowellenpuls eingekoppelt. Insbesondere wird Wandablagerungen durch unvollständige Verbrennung vorgebeugt. Jede Verbrennung läuft durch die Einsatzsteuerung und die zeitliche Pulsbreitensteuerung der beiden Mikrowellenpulse im Zünd- bzw. Verbrennungstakt vollständig und damit optimal ab. Dadurch sind erheblich magerere Luft-Kraftstoff-Gemische zu zünden kein Problem mehr.

Aus dieser physikalisch vorteilhaften Zündart und Unterstützung der Verbrennung ergeben sich in Folge weitere Vorteile technischer Natur und umweltfreundlicher sowie wirtschaftlicher Art:

- Erhöhung der Flammgeschwindigkeit und damit bessere Durchbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemischs.
- Verbesserung des Wirkungsgrads von Kraftstoffmotoren.
- Reduktion von Schadstoffemissionen bei niederen Verbrennungstemperaturen.
- Einsparung von Kraftstoff.
- Erhöhung der Lebensdauer des Kraftstoffmotors.
- Bei fremdgezündeten Kraftstoffmotoren wie Ottomotoren, genügen konventionelle Benzinmotoren, da Magergemische zuverlässig gezündet werden. Kolbengetriebene Flugzeugmotoren, die wegen der dünnen Luft in großer Höhe bisher fette Kraftstoffgemische benötigen sind durch solche Benzinmotoren ersetzbar.
- bei Dieselmotoren erfolgt die Selbstzündung bei niedrigerer Verdichtung.
- Teure Katalysatoreinrichtungen sind wegen fehlender Schadstoffemission überflüssig.

Die Erfindung wird für den Einsatz in einer geläufigen Motorklasse anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 Modenausbildung im mit ungezündeten Treibstoff gefüllten Brennraum,

Fig. 2 Modenausbildung im Brennraum bei weitgehend verbranntem Treibstoff,

Fig. 3 hexagonale Brennraumgeometrie.

Die in den Brennraum zur Anregung der Mode niedrigster Ordnung, TM_{010} , einzukoppelnde Mikrowelle wurde für die vorliegende Geometrie des Brennraums, im wesent-

lichen der zylindrische Brennraumdurchmesser, bei 2.8 GHz ermittelt. Dieser Mode ist zentral und liegt mit seinem Maximum auf der Kolbenachse. Zwar ist er denkbar für eine Zündung des Kraftstoff-Gemischs, hat aber nur den Achsbereich als Zündquelle. Zum Rand hin, dem dem Quadrat eingeschriebenen Kreis in der Darstellung von Fig. 1 nimmt das Feld monoton auf Werte ab, die keine Bedeutung mehr für eine Zündung bzw. Verbrennungsunterstützung haben.

Die Untersuchung der Einkopplung höherer Frequenzen in den Brennraum ergab für die Mikrowelle mit der Frequenz 20 GHz eine optimale Modenanregung für einerseits die Zündung und andererseits die nachfolgende Verbrennungsunterstützung. (Noch höhere Frequenzen erregen instabile, nahezu beliebige jedoch unbrauchbare Modengemische.) Beim gerade noch nicht gezündeten Kraftstoff-Luft-Gemisch bildet sich im Brennraum die Mode niedriger Ordnung, nämlich TM_{020} , und die Whispering-Gallery-Mode TM_{1210} aus (Fig. 1). Hiermit sind ideale Bedingungen für eine simultane Zündung des Luft-Kraftstoffs im Brennraum gegeben, einerseits im zentralen Bereich nahe der Kolbenachse und andererseits nahe der Zylinderwand durch viele um die Achse gleichverteilte Zündquellen. Dabei dehnt sich das Modengemisch säulenartig über die Brennraumhöhe aus. Die Gesamtfeldhomogenität dieses Modengemischs ist zudem höher als bei der TM_{010} -Mode. In Fig. 1 zeigen die gelben und Richtung rot gehenden Bereiche die Gebiete an, in denen die Feldstärke sicher über der Zündfeldstärke für das Luft-Kraftstoff-Gemisch liegen.

Nachdem die Zündung erfolgte, läuft die Verbrennung zunächst unbeeinflusst selbständig mit der ihr vorübergehend dominierenden Eigendynamik ab, so daß sich aufgrund der Plasmaausbildung auch nicht wirksam eine Mikrowelle einkoppeln läßt. Damit einher geht eine starke Erhöhung der Resonatorgüte. Durch Temperaturunterschiede insbesondere nahe der Wand kondensieren Kraftstoff- und Verbrennungsrückstände. Letztere insbesondere schlagen sich auf den Brennraumwänden nieder und bauen Verschmutzungen auf. Im abklingenden Verbrennungsprozeß ist eine erneute Mikrowelleneinkopplung möglich, allerdings wird aufgrund der jetzt bestehenden Mikrowelleneigenschaften im Brennraum nur noch die Whispering-Gallery-Mode der Ordnung TM_{1210} angeregt (Fig. 2). Dafür aber teilt sich die gesamte Energie des Modengemischs für die Zündung jetzt in dem alleinigen Mode hoher Ordnung gleichverteilt auf. Gerade dieser Mode hoher Ordnung ist von Vorteil, da er gewissermaßen einen um die Kolbenachse gleichverteilten Zündquellenring aus Zündquellsäulen nahe der Brennraumwand darstellt, mit dem restlicher Kraftstoff und Verbrennungsrückstände im Wandbereich vollständig verbrannt werden. Durch die in dieser Phase sich nicht mehr ausbildende Mode niedriger Ordnung verteilt sich die Leistung des Mikrowellenpulses jetzt völlig auf die Mode hoher Ordnung. Die Feldstärke in den Zündquellenbereichen liegt erheblich über der Zündfeldstärke aus dem Zündintervall und zeigt sich daher durch ein tiefes Rot. Für die restliche Verbrennung herrschen dort ausgezeichnete Voraussetzungen.

Eine weitere Optimierung der Verbrennung besteht in einer geänderten Brennraumgestaltung. Eine solche ist der in Fig. 3 schematisch dargestellte, hexagonale Brennraum. Der Vorteil gegenüber der zylindrischen Geometrie besteht darin, daß keine Feldfokussierung (kaustische Strukturen) und Überhöhungen, die die Feld- und Zündverteilung inhomogen gestalten, auftreten und somit eine gleichmäßige Ausleuchtung des Brennraums im Zentrum sowie am Rand auch bei hochmodiger Erregung besteht. Technisch am wenigsten problematisch ist, wenn der regelmäßige hexagonale Querschnitt des Brennraums dem nach wie vor kreiszylind-

drischen Querschnitt des Kolbenhubraums umschrieben wird. Natürlich kann der Brennraumquerschnitt auch kleiner, dem Kolbenquerschnitt gar einbeschrieben sein, das würde jedoch aus Sicherheitsüberlegungen heraus nicht durchgeführt werden. Mikrowellentechnisch wären die Eigenschaften qualitativ gleich.

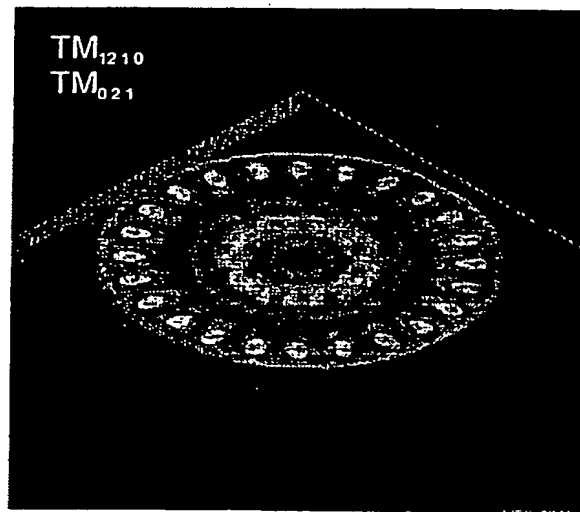
Patentansprüche

1. Mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung für einen Kraftstoffmotor mit mindestens einem Brennraum zur Zündung eines in den jeweiligen Brennraum eingebrachten Kraftstoffgemischs und zur unterstützenden Verbrennung desselben, bestehend aus einer pulsaren Mikrowellenquelle von der mindestens eine an das System angepaßte Mikrowellenleitung (Hohlleiter, Koaxialkabel, Mikrostreifenleitung) zum jeweiligen durch Zylinder und Kolben gebildeten Brennraum (Resonatorraum) des Motorblocks führt, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Kraftstoffzündung durch den zum Zündzeitpunkt in den Brennraum einzukoppelnden Mikrowellenpuls erfolgt, die Brennraumgestaltung eine bevorzugte Frequenz der über mindestens eine Einkoppelöffnung einzukoppelnden Mikrowelle festlegt, die darin für die Zündung und Verbrennung eine jeweils bevorzugten Mode oder ein jeweils bevorzugtes Modengemisch anregt, der zur Zündung des Luft-Kraftstoff-Gemisches in den Brennraum eingekoppelte Mikrowellenpuls mindestens zwei Moden anregt, die eine elektrische Feldverteilung aufweisen, die einer Gleichverteilung am Wert der Zündfeldstärke im gesamten Brennraum am nächsten kommt und sich durch zentral konzentrierte Moden niederer Ordnung mit Moden hoher Ordnung (Whispering-Gallery-Moden) ergänzen, womit sich eine Gesamthomogenität der Feldverteilung im Brennraum vom Zentrum zur Berandung sowie in axialer Ausdehnung ergibt, der zur Unterstützung der restlichen Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches in den Brennraum eingekoppelte Mikrowellenpuls nur noch einen am Brennraumrandbereich um die Kolbenachse gleichverteilte Mode hoher Ordnung (Whispering Gallery Mode) anregt, wodurch Kondensatablagerungen an der Brennraumwand durch unvollständig verbrannte Kraftstoffreste vorgebeugt wird, der Einsatzzeitpunkt und die Breite des jeweiligen Mikrowellenpulses für die Zündung und für die Verbrennung steuerbar ist.
2. Mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Brennraum im Querschnitt zylindrisch ist.
3. Mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Brennraum im Querschnitt regelmäßig polygonal, mindestens jedoch quadratisch ist.
4. Mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Brennraum hexagonal ist.
5. Mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung nach den Ansprüchen 1 und 4, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Einkoppelöffnungen für die Mikrowelle im Zylinderkopfbereich vorzugsweise im Bereich bestmöglicher Anregung einer gewünschten Mode liegt.

6. Mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Mikrowellenquelle eine röhrentechnische Baukomponente wie ein Magnetron ist.
7. Mikrowellentechnische Zünd- und Verbrennungsunterstützungs-Einrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Mikrowellenquelle eine Halbleiterbaukomponente ist.

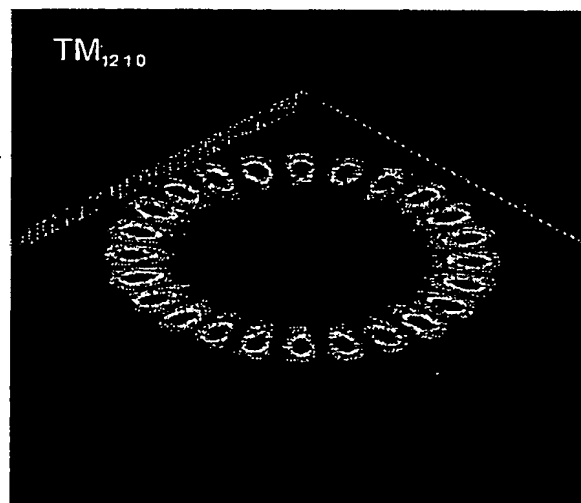
Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

Fig. 1



f=20 GHz Zündung

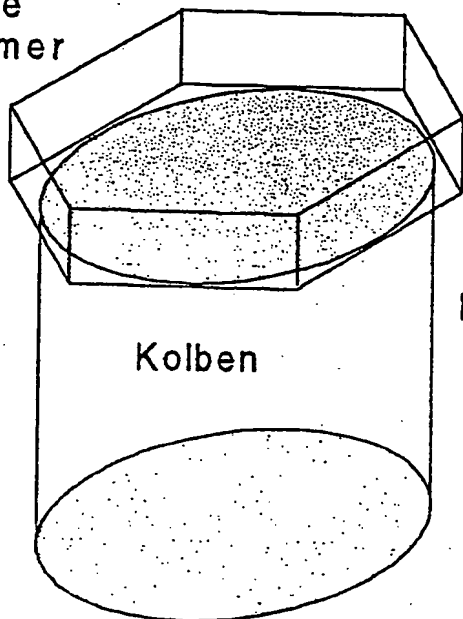
Fig. 2



f=20 GHz Verbrennungsunterstützung

Fig. 3

Hexagonale
Brennkammer



Hub

Kolben